

Verbesserte Abbildungseigenschaften von Dachprismen

Adolf Weyrauch*, Bernd Dörband**, Aalen

1 Einleitung

Dachprismen sind optische Elemente, die in optischen Geräten zur Bildaufrichtung Anwendung finden. Aufgrund ihrer Kompaktheit und ihres geringen oder fehlenden Achsversatzes kommen sie bei Ferngläsern häufig zum Einsatz. Die Vielfalt der möglichen Dachprismen-Umkehrsysteme ist groß. Praktisch durchgesetzt haben sich Geradsichtprismen, bei denen ein achsparalleler Strahl keine winkelmäßige Ablenkung erfährt [1]. *Abbe-König*-Prismen mit 4 internen Reflexionen (Bild 1), die eine schlanke Bauweise erlauben, und *Pechan*-Prismen (Bild 2) mit 6 internen Reflexionen seien als Beispiele genannt. Letztere führen wegen ihrer Strahlenaufwicklung zu kurzen, kompakten Bauformen

Die traditionellen *Porro*-Systeme (Bild 3) erzeugen einen erheblichen Achsversatz und führen somit auf ihre charakteristische Bauweise. Wegen ihres großen Objektivabstandes und der damit verbundenen besseren Tiefenaufklärung haben *Porro*-Systeme auch heute noch ihre Bedeutung, jedoch wären die modernen, kompakten Ferngläser ohne die Einführung von Dachprismen in ihrer heutigen Form nicht denkbar.

Bekannt ist, daß Dachprismensysteme, auch wenn sie perfekt gefertigt und montiert werden, zu einer Bildverschlechterung

* Adolf Weyrauch, Aalen

** Dr. Bernd Dörband, c/o Carl Zeiss, Postfach, D-7082 Oberkochen

Verbesserte Abbildungseigenschaften von Dachprismen

... führen [2], [3]. Diese Verschlechterung ist je nach Objektstruktur, Beleuchtungsverhältnis und Beobachter-auge mehr oder weniger bemerkbar. Sie läßt sich weitgehend beseitigen, wenn die Dachflächen mit einer metallischen Schicht verspiegelt werden, jedoch sind Reflexionen an metallischen Flächen stets mit Absorption verbunden. Der Lichtdurchlaßgrad eines Fernglases würde damit typischerweise um mehr als 10 % verringert werden. Durch Aufdampfen von dielektrischen Schichten auf die Dachflächen läßt sich die Qualitätseinbuße ohne Lichtverlust wettmachen. Im Hause Carl Zeiss wurden erstmalig Dachprismen-Ferngläser

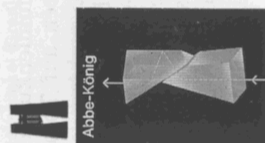


Bild 1. Abbe-König-Prisma

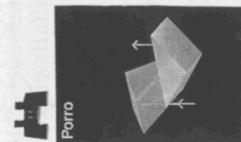


Bild 2. Pechan-Prisma

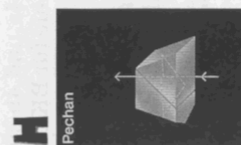


Bild 3. Porro-Prisma

mit einem „P-Belag“ (P steht für „Phasenkorrektur“) versehen, der diese wellenoptisch bedingte Bildverschlechterung beseitigt.

Im folgenden wird die wellenoptische Wirkungsweise von Dachprismen sowie die Beeinflussung durch eine Beschichtung der Dachflächen erläutert. Anhand von Beispielen wird die Bildverbesserung durch den Carl Zeiss P-Belag demonstriert.

2 Wellenoptische Wirkungsweise von herkömmlichen Dachprismen

Die internen Strahlenumlenkungen der hier diskutierten Prismensysteme basieren auf Totalreflexion an den Glas-Luft-Grenzflächen (Ausnahme: verspiegelte Fläche am Pechan-Prisma). Bei der Totalreflexion entsteht zwischen dem in der Einfallsebene schwingende Licht und dem dazu senkrecht schwingenden Licht eine relative Phasenverschiebung δ . Die Phasenverschiebung ist abhängig vom Einfallswinkel ε und der Brechzahl n des Glasmaterials. Gl. 1 beschreibt den mathematischen Zusammenhang***.

$$\tan \delta/2 = - \frac{n \sin^2 \varepsilon}{\cos \varepsilon \sqrt{n^2 \sin^2 \varepsilon - 1}} \quad (1)$$

In Bild 4a und 4b sind die relativen Phasenverschiebungen der e-Linie für BK7 und F2 über dem Einfallswinkel ε aufgetragen.

Beim Dachprisma wird das einfallende Strahlenbündel in zwei Hälften geteilt. Bild 5 zeigt den prinzipiellen Strahlen-gang.

*** In der Literatur, z. B. [4], findet man auch andere Formulierungen, bei denen ein anderes Koordinatensystem zugrunde liegt.

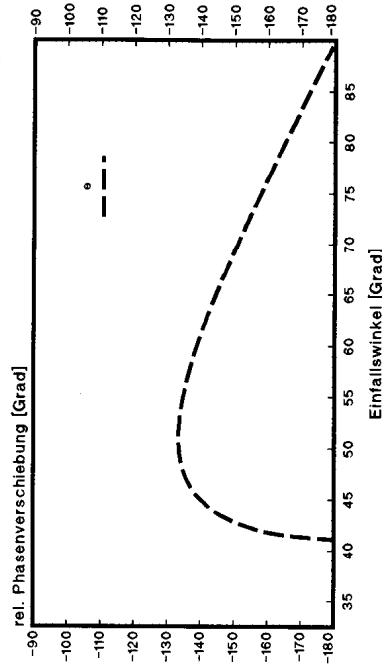


Bild 4 a. Relative Phasenverschiebung bei Totalreflexion an BK7

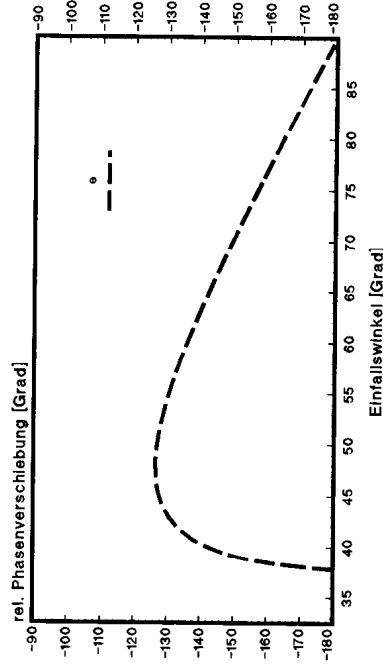


Bild 4 b. Relative Phasenverschiebung bei Totalreflexion an F2

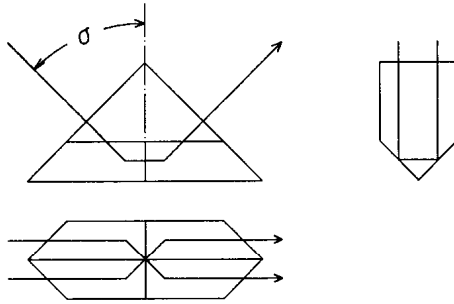


Bild 5. Strahlengang bei Reflexion an Dachflächen

Beide Hälften unterscheiden sich durch die Reihenfolge, in der sie die Dachflächen passieren, aber auch in der Art ihrer erworbenen Polarisationszustände. Zur Berechnung der Polarisationseffekte ist eine linear polarisierte Welle in ihre Komponenten senkrecht und parallel zur Einfallsebene an der ersten Dachfläche zu zerlegen. Nach Einführung der Phasenverschiebung (siehe Gl. (1)) ist für die Totalreflexion an der zweiten Dachfläche in gleicher Weise zu verfahren. Die austretende Welle ist je nach Einfallswinkel, Brechzahl des Prismas und Polarisationsrichtung der einfallenden Welle elliptisch polarisiert. Bild 6 a – d zeigt Beispiele für verschiedene Polarisationsrichtungen an einem BK7-Prisma mit einer um $\sigma = 30^\circ$ geneigten Dachkante.

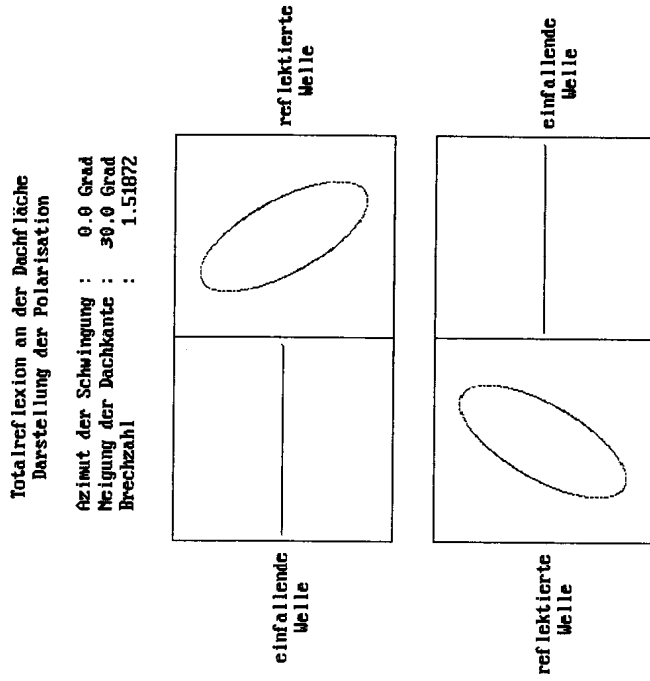


Bild 6 a. Elliptische Polarisation am Dachprisma aus BK7, $\sigma = 30^\circ$, Azimut der einfallenden Schwingung $= 0^\circ$.

**Totalreflexion an der Dachfläche
Darstellung der Polarisation**

Azimuth der Schwingung : 30.0 Grad
Neigung der Dachkante : 30.0 Grad
Brechzahl : 1.51872

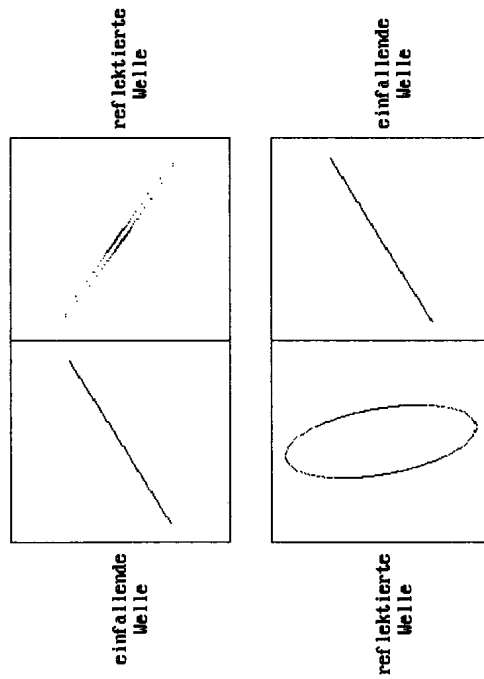


Bild 6 b. Elliptische Polarisation am Dachprisma aus BK7, $\sigma = 30^\circ$, Azimut der einfallenden Schwingung $= 30^\circ$

**Totalreflexion an der Dachfläche
Darstellung der Polarisation**

Azimuth der Schwingung : 60.0 Grad
Neigung der Dachkante : 30.0 Grad
Brechzahl : 1.51872

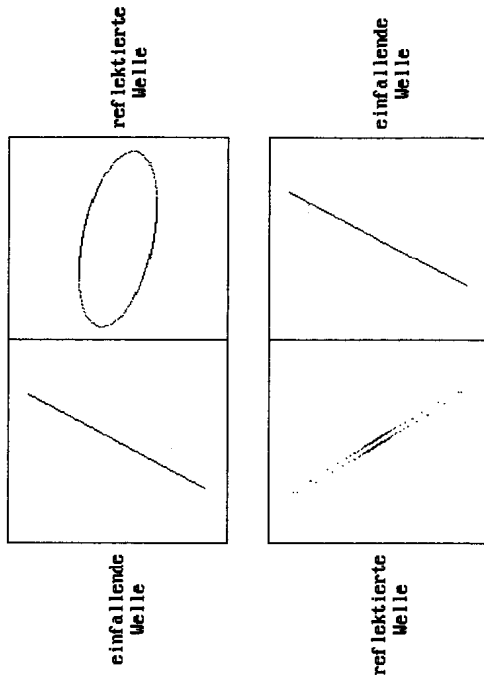


Bild 6 c. Elliptische Polarisation am Dachprisma aus BK7, $\sigma = 30^\circ$, Azimut der einfallenden Schwingung $= 60^\circ$

Totalreflexion an der Dachfläche
Darstellung der Polarisation

Azimuth der Schwingung : 90.0 Grad
Neigung der Dachkante : 30.0 Grad
Brechzahl : 1.51872

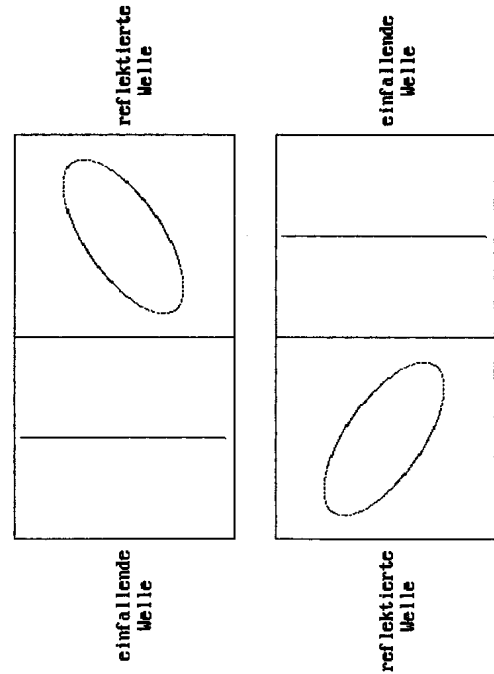


Bild 6 d. Elliptische Polarisation am Dachprisma aus BK7, $\sigma = 30^\circ$, Azimut der einfallenden Schwingung = 90°

Die Amplitude der von den Dachflächen zurückkommenden Wellen wird berechnet aus:

$$\vec{a}'_1 = \vec{D} \vec{P}_2 \vec{D}^{-2} \vec{P}_1 \vec{D} \cdot \vec{a} = \vec{M}_1 \cdot \vec{a} \quad (2 \text{ a})$$

$$\vec{a}'_2 = \vec{D}^{-1} \vec{P}_1 \vec{D}^2 \vec{P}_2 \vec{D}^{-1} \cdot \vec{a} = \vec{M}_2 \cdot \vec{a} \quad (2 \text{ b})$$

$$\text{mit } \vec{a} = \begin{pmatrix} a_p \\ a_s \end{pmatrix},$$

wobei a_p und a_s die in der bzw. senkrecht zur Einfallsebene schwingenden Komponenten sind. Der Index 1 kennzeichnet den Fall, daß der Strahl zuerst auf die Dachfläche 1 dann auf 2 fällt. Der Index 2 kennzeichnet den umgekehrten Fall.

\vec{P}_1 und \vec{P}_2 sind die Phasenmatrizen der Flächen 1 und 2 mit:

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} e^{i\delta_1} & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2} \end{pmatrix}$$

δ ist die relative Phasenverschiebung nach Gl. (1).

\vec{D} ist die Drehmatrix, die die Drehung in die jeweilige Einfallsebene beschreibt, mit:

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

γ ist der halbe Winkel, den die Einfallsebenen der beiden Dachflächen einschließen.

Aus den Gl. (2 a) und (2 b) gehen zwei wichtige Erkenntnisse hervor:

- Der Polarisationszustand bleibt unbeeinflusst, wenn beide Phasenmatrizen jeweils gleich der Einheitsmatrix sind:
 $\vec{a}'_1 = \vec{a}_2 = \vec{a}$ wenn $\vec{P}_1 = \vec{P}_2 = \vec{E} \iff \delta_1 = \delta_2 = 0$.
Das ist dann der Fall, wenn die Phasenverschiebungen δ_1 und δ_2 an den Dachflächen zu Null werden.

- Die Polarisationszustände \vec{a}'_1 und \vec{a}'_2 sind gleich, wenn eine der beiden Phasenmatrizen gleich der Einheitsmatrix ist:

$$\vec{a}'_1 = \vec{a}'_2 \text{ wenn } \vec{P}_1 = \vec{E} \text{ oder } \vec{P}_2 = \vec{E} \iff \delta_1 = 0 \text{ oder } \delta_2 = 0.$$

Das ist dann der Fall, wenn entweder die Phasenverschiebung δ_1 oder δ_2 zu Null wird.

In den unterschiedlich polarisierten Wellen der beiden Prismenhälften gibt es gleichphasig und gegenphasig schwingende Anteile. Die Größe des gegenphasigen Anteils ist für die Bildbeeinflussung im natürlichen Licht maßgebend. Bei den geradsichtigen Dachprismen für Ferngläser beträgt der Intensitätsanteil ca. 70 %. Da bei der Beobachtung durch das Auge beide Teilbündel wieder zusammengesetzt werden, tritt durch Interferenz eine Auslöschung des gegenphasigen Anteils im geometrischen Punktbild auf. Aufgrund der Energieerhaltung findet sich das Licht seitlich vom geometrischen Bildpunkt wieder.

Für die mathematische Behandlung des Punktbildes werden ebene Wellenfronten und eine kreisrunde Pupille angenommen. Die Dachkante halbiert die Pupille. Bild 7 a zeigt die

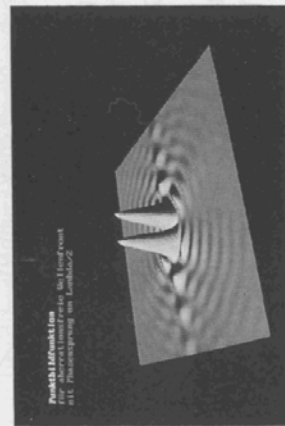


Bild 7 a. Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge

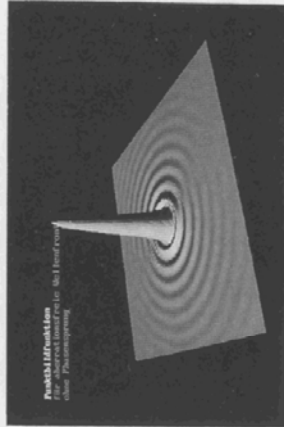


Bild 7 b. Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes ohne Phasenverschiebung zwischen den Pupillenhälften

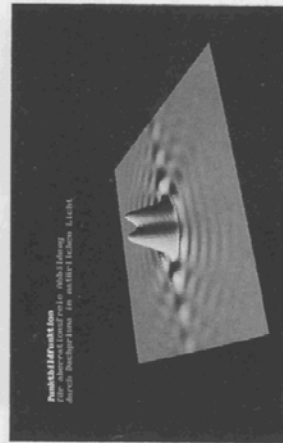


Bild 7 c. Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes bei 70 %-Anteil aus 7 a und 30 %-Anteil aus 7 b

Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes, wenn Phasenverschiebungen von einer halben Wellenlänge zwischen den Teilbündeln vorliegen. Bild 7 b zeigt den Fall für Phasengleichheit der Teilbündel. Im Normalfall setzt sich die Lichtverteilung aus 70 % von 7 a und 30 % von 7 b zusammen, wie sie in Bild 7 c gezeigt ist.

Daß dies der Praxis entspricht, zeigen die Bilder 8 a, b, c von Sternaufnahmen durch ein Fernglas mit Dachprisma. Das aus natürlichem Licht entstandene Punktbild (Bild 8 c) ist nicht mehr rotationssymmetrisch. In Richtung senkrecht zur Dachkante ergibt sich eine „Lichtpunktreihe“, die der Beobachter als strahlenförmige Störung bei Betrachtung eines leuchtenden Punktes empfindet.

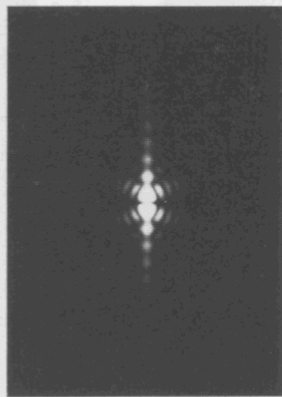


Bild 8 a. Sternaufnahme durch ein Fernglas mit herkömmlichem Dachprisma (gegenphasiger Anteil)

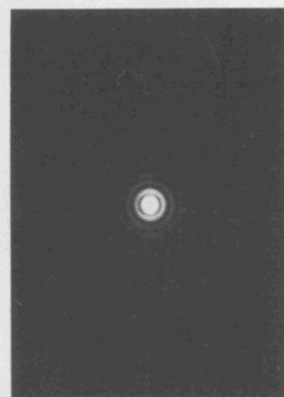


Bild 8 b. Sternaufnahme durch ein Fernglas mit herkömmlichem Dachprisma (gleichphasiger Anteil)

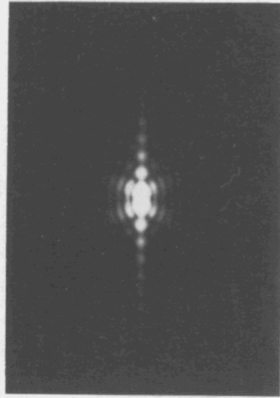


Bild 8 c. Sternaufnahme durch eine Fernglas mit herkömmlichem Dachprisma (natürliches Licht)

Diese Überstrahlung führt zur Kontrastminderung in der Umgebung des Punktes. Die Auswirkungen auf die Kontrastübertragungsfunktion (MTF) sind in Bild 9 a gezeigt. Die Berechnung für den Fall des Phasensprungs um eine halbe

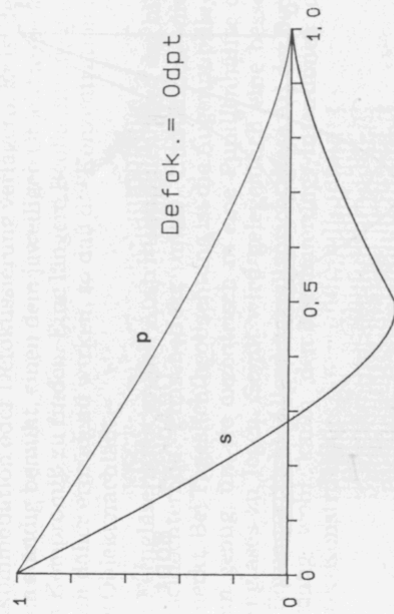


Bild 9 a. Realteil der OTF für den Fall der Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften (s = senkrecht zur Dachkante, p = parallel zur Dachkante)

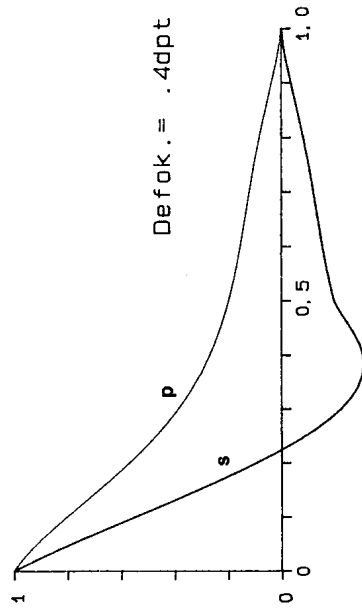


Bild 9 b. Realteil der OTF für den Fall der Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften bei Defokussierung um 0,4 dpt (s = senkrecht zur Dachkante, p = parallel zur Dachkante)

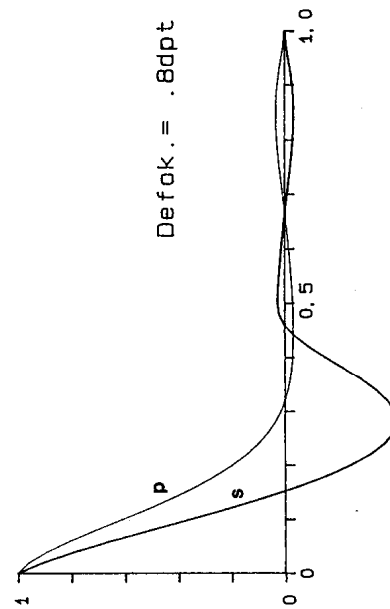


Bild 9 c. Realteil der OTF für den Fall der Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften bei Defokussierung um 0,8 dpt (s = senkrecht zur Dachkante, p = parallel zur Dachkante)

Wellenlänge ergibt eine Nullstelle in der MTF mit anschließender Pseudoauflösung für das Azimut senkrecht zur Dachkante. Dies wird aus dem gezeigten Verlauf des Realteils der OTF (= MTF mit Vorzeichen in diesem speziellen Fall) in Bild 9 a besonders deutlich. Pseudoauflösung liegt vor in den Bereichen negativen Realteils. Parallel zur Dachkante bleibt die MTF unbeeinflusst – sie entspricht der perfekten MTF, wie sie sich bei konstanter Phase ergibt.

Die Zone des maximalen Pseudokontrastes kann durch Defokussierung des Gerätes oder durch Akkommodation des Beobachters in gewissen Grenzen zu niedrigeren Ortsfrequenzen verschoben werden. Dadurch werden Strukturen in der Verunschärfungszone wieder sichtbar, wenn auch im Pseudokontrast. Die Bilder 9 b, c, zeigen den Realteil der OTF für den Fall einer Defokussierung um jeweils 0,4 dpt und 0,8 dpt, wenn eine aberrationsfreie Wellenfront mit Phasensprung um $\lambda/2$ vorliegt.

Ein geübter Beobachter wird bei der Betrachtung bestimmter Feinheiten die Zone des verschwindenden Kontrastes durch Akkommodation oder Defokussierung verlagern. Er ist demnach ständig bemüht, einen dem jeweiligen Objekt angepaßten Kompromiß zu finden. Eine längere Beobachtungsdauer kann daher ermüdend wirken, so daß die Konzentration auf das Objekt nachläßt.

Bei Ferngläsern mit großen Austrittspupillen wird der bildverschlechternde Phaseneffekt unter Umständen nicht bemerkt. Bei Tageslichtbeobachtung ist die Augenpupille oft klein genug, um sie exzentrisch in eine Pupillenhälfte des Fernglases zu legen. Somit wird gelegentlich eine bessere Auflösung erreicht. Allerdings entspricht diese Art der Beobachtung wohl kaum den Optimierungs-Intentionen des Optik-Konstrukteurs.

3 Verbesserung der Abbildung durch Phasenkorrektur

Dielektrische Schichten haben sich als geeignet erwiesen, Reflexionseigenschaften an Grenzflächen optischer Medien

zu beeinflussen. Sie können auch verwendet werden, um die Phasenverschiebungen bei Totalreflexion zu eliminieren [5]. Da die Wirkung sich sowohl auf das gesamte sichtbare Licht als auch auf einen gewissen Einfallswinkel-Bereich erstrecken muß, ist die Verwendung eines dielektrischen Schichtpaketes angebracht.

Nach Gl. (2) ist bekannt, daß es prinzipiell genügen würde, an einer Dachfläche die Phasenverschiebung zwischen den unterschiedlichen Polarisationsrichtungen zu beseitigen.

Bei Carl Zeiss werden Dachflächen von Umkehrsystemen mit Mehrfachbeschichtungen versehen. Das Beschichtungsverfahren ist dem der Entspiegelungsschichten sehr ähnlich. Wegen der phasenkorrigierenden Wirkung wird die Beschichtung kurz „P-Belag“ genannt. Der P-Belag beseitigt alle wellenoptisch bedingten Nachteile, die ein Dachprisma von Haus aus mit sich bringt. Die Auflösungen senkrecht und parallel zur Dachkante sind gleich. Bereiche der Pseudoauflösung werden vermieden (Bilder 10 a, b, c). Die Lichtverteilung im Bild eines leuchtenden Punktes entspricht dem

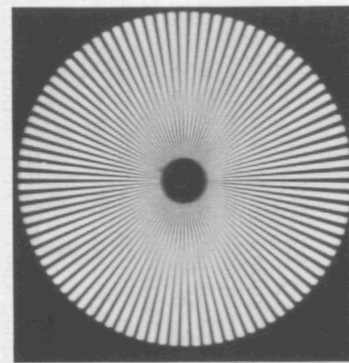


Bild 10 a. Aufnahme eines Siemenssterns durch ein Fernglas mit Dachprisma bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften

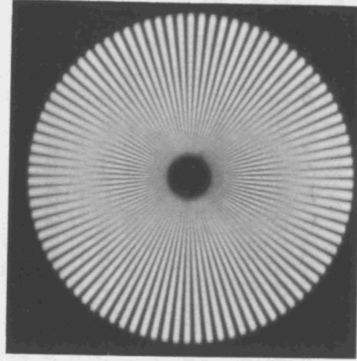


Bild 10 b. Aufnahme eines Siemenssterns durch ein um 0,5 dpt defokussiertes Fernglas mit Dachprisma bei Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge zwischen den Pupillenhälften

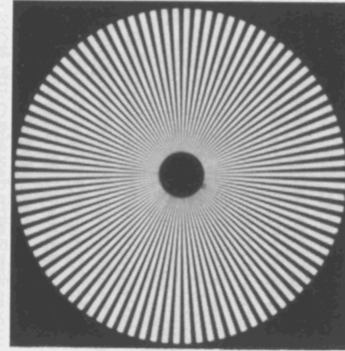


Bild 10 c. Aufnahme eines Siemenssterns durch ein Fernglas mit phasenkorrigiertem Dachprisma

Bild 7 b. Der geübte Beobachter hat auf Anhieb den Eindruck eines schärferen und kontrastreichen Bildes, insbesondere bei kontrastreichen Objekten. Längere Beobachtungen können ermüdungsfreier durchgeführt werden, da nicht strukturabhängig akkommodiert werden muß.

4 Praktische Aspekte zur Unterscheidung von Ferngläsern mit und ohne Phasenkorrektur

Dem wenig geübten Beobachter wird es zunächst schwerfallen, einem Dachprismen-Fernglas seine Phasenkorrektur anzumerken. Deshalb seien hier einige praktische Hinweise für den Nachweis des P-Belages gegeben.

Die einfachste Nachweismethode besteht darin, hell leuchtende, punktförmige Objekte (Sterne, Straßenlaternen, Leuchtreklame usw.) möglichst in der Dunkelheit zu betrachten. Wenn die Helligkeitsregelung des Auges für das eigentliche Objekt schon in der „Sättigung“ ist, ist die strahlenförmige Störung deutlich über der Empfindlichkeitsschwelle. Bei einem binokularen Dachprismenglas ohne Phasenkorrektur sind deshalb zwei helle Linien sichtbar, die sich im Objektpunkt kreuzen. Die Helligkeit der Linien nimmt zu ihren Enden hin ab. Da die hellen Linien jeweils senkrecht zur Dachkante entstehen, ist ihr Winkel zueinander von der Einstellung des Augenabstandes abhängig. Bei Phasenkorrektur sind diese Linien nicht oder nur in ganz geringem Maße sichtbar.

Vergleichende Testfelbeobachtungen vorzugsweise mit Siemensstern sind ebenfalls gut geeignet, um phasenkorrigierte von nicht-phasenkorrigierten Ferngläsern zu unterscheiden. Die auftretenden Effekte sind in den Bildern 10 a, b, c gezeigt, wobei jedoch mit polarisations-optischen Mitteln die oben beschriebenen gleichphasigen Anteile herausgefiltert wurden. Im natürlichen Licht erscheinen die Effekte in abgemilderter Form. Ein gutes Kriterium ist die Änderung der Bildqualität bei seitlicher Bewegung der Augenpupille. Bei phasenkorrigierten Ferngläsern entspricht die zentrische Lage dem besten Bild.

Mit zwei Polarisationsfiltern läßt sich ein weiterer Test auf einfache Weise durchführen. Als Lichtquelle wäre grün gefiltertes Lampen- oder Tageslicht geeignet. Man bringe das zu prüfende Fernglas zwischen die zwei Polarisationsfilter, deren Achsen entweder parallel oder gekreuzt sind. Die Dachkante muß parallel zu einer der Achsen ausgerichtet sein. Man beobachtet das durchtretende Licht. Dabei ergeben sich folgende Unterscheidungsmerkmale:

Fernglas ohne P-Belag: Das durchtretende Licht erscheint zwischen gekreuzten Polarisatoren heller als zwischen parallelen Polarisatoren.

Fernglas mit P-Belag: Das durchtretende Licht erscheint zwischen gekreuzten Polarisatoren dunkler als zwischen parallelen Polarisatoren.

5 Zusammenfassung

Dachprismen wirken sich aufgrund von Phaseneffekten bei der Totalreflexion an den Dachflächen ungünstig auf die Abbildungsqualität aus. Die Lichtwellen verschiedener Polarisationsrichtungen erleiden unterschiedliche Phasenverschiebungen abhängig von ihren Durchlaufrichtungen. Durch Aufbringen einer Phasenkorrektur, d. h. eines dielektrischen Schichtpaketes an mindestens einer Dachfläche wird die Abbildungsqualität ohne Absorptionsverlust dem Optimum angeglichen. Das akkommodative Verlagern der MTF-Nullstelle entfällt, wodurch ein ermüdungsfreies Beobachten ermöglicht ist. Die Auflösung wird gesteigert, Bereiche der Pseudoauflösung verschwinden, der Kontrast bei feinen Strukturen wird verbessert.

7 Literatur

- [1] R. Liebmann: Geradsichtige Feldstecher-Prismenumkehrsysteme ohne oder mit nur geringem Achsversatz
OPTIK 26, Heft 3 (1967) S. 264–272
- [2] G. Joos, Zeiss-Nachr., 4. Folge (1943) S. 221
- [3] A. J. Mahan, JOSA 35 (1945) S. 623
- [4] M. Born, E. Wolf: Principles of Optics Pergamon Press, Oxford, 6. Aufl. 1980
- [5] A. Weyrauch: Totalreflexierender Körper Patentschrift DBP 1020195 (1955)